

文章编号: 1671-0576(2005)01-0043-04

# 一种新型面阵列天线的设计

牛运丰, 邢 峥, 王学田

(北京理工大学信息科学技术学院电子工程系, 北京 100081)

**摘要:** 介绍了一种新型面阵列天线——贝塞尔阵列天线, 给出了设置旁瓣水平、计算方向性和计算半功率波束宽度的方法, 并与理想切比雪夫平面阵列天线进行了比较, 结果证明贝塞尔阵列天线的性能稳定, 在多阵子的情况下比切比雪夫天线阵列的方向性系数高。

**关键词:** 阵列天线; 贝塞尔函数; 切比雪夫函数

**中图分类号:** TN823.27      **文献标识码:** A

## The Design of a New-style Planar Array Antenna

NIU Yun-feng, XING Yao, WANG Xue-tian

(Dept. of Electronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** A new-style of planar array antenna that called Bessel array antenna is introduced. Methods to set the maximal sidelobe level and compute the directivity and the half-power beam width are described. And makes it compare to the optimal Chebyshev planar array antenna. The result shows that Bessel planar array antenna has stable performance and in higher directivity than Chebyshev planar array antenna for larger number of elements.

**Key words:** array antenna; Bessel function; Chebyshev function

强方向性天线<sup>[1]</sup>。

## 0 引言

随着移动通信和空间探测技术的发展, 对天线的方向性要求越来越高。平面天线阵可在两个主平面上控制波束宽度, 并形成笔杆状波束, 实现

收稿日期: 2004-12-01

**作者简介:** 牛运丰(1978-), 男, 硕士研究生, 从事目标特性、微波射频电路及天线的研究; 邢峥(1979-), 男, 硕士研究生, 从事天线与电磁散射高精度理论建模的研究; 王学田(1961-), 男, 教授, 从事目标特性、微波毫米波探测技术的研究。

## 1 概述

本文介绍了一种新型面阵列天线——贝塞尔阵列天线。该天线的最大旁瓣是可以控制的, 且方向性好, 但与理想切比雪夫平面阵列天线相比, 它的半功率波束宽度较宽。

贝塞尔阵列天线的辐射模式接近于均匀的平面阵列, 但其最大旁瓣电平是可以调节的。实际上, 均匀面阵列是贝塞尔阵列的一种特殊情况。

且在阵元数很多的情况下,要求其具有相同阵元数、相同阵元尺寸和相同旁瓣电平时,贝塞尔阵列天线的方向系数远大于切比雪夫阵列天线的方向系数。只是贝塞尔阵列天线的波束宽度比理想切比雪夫阵列的波束稍微宽一些。

切比雪夫阵列的重要性质,是在它的辐射模式下提供等幅的旁瓣。因此,如果要求在一定的旁瓣水平下波束宽度最小,或者要求在一定波束宽度下旁瓣水平最低,那么切比雪夫阵列是最适合的。但是,当阵列的元数增多时,它的方向性趋于饱和,所以切比雪夫面阵列的设计方法不适合用于元数很多的阵列天线的设计<sup>[2]</sup>。

与线阵相比,面阵可以提供更多的变量来控制和形成阵的模式,所以它更通用,能够设计出更对称的模式,且旁瓣更低。天线的主波束能实现对空间任意一点扫描,应用范围较广,主要包括:跟踪雷达、搜索雷达、微波遥感和通信等。

## 2 贝塞尔阵列天线的设计公式

### 2.1 贝塞尔阵列的电流分布

用来设计 FIR 滤波器的凯泽窗函数可定义为

$$w[n] = \begin{cases} I_0 \left\{ \beta \left[ 1 - \left( \frac{n-\alpha}{\alpha} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} & (0 \leq n \leq M) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $\alpha = \frac{M}{2}$

式中,  $(M+1)$  为窗的长度;  $I_0(\cdot)$  表示第一类修正的零阶贝塞尔函数;  $\beta$  为影响窗函数傅里叶变换的旁瓣电平的参数。由式(1)可知,当  $0 \leq i \leq M$  时,  $w[i] = w[M-i]$ 。

采用  $N$  点凯泽窗函数的系数,作为  $N$  元对称线天线阵的激励电流的模值,其电流方程为

$$\alpha_m = \begin{cases} I_0 \left\{ \beta \left[ 1 - \left( \frac{m-0.5}{M-0.5} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} & (N = 2M) \\ I_0 \left\{ \beta \left[ 1 - \left( \frac{m-1}{M-1} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} & (N = 2M-1) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $1 \leq m \leq M$ ,  $\alpha_1$  为阵中心元的激励;  $\alpha_M$  为两边阵子的激励。式(2)也可写成  $\alpha_M = I_0(0) = 1$ 。

对线阵情况的分析可以定义  $L \times L$  贝塞尔面阵列的激励电流为

$$I_{mn} = \begin{cases} I_0 \left[ \beta \sqrt{1 - \left( \frac{m-0.5}{M-0.5} \right)^2} \right] & (L = 2M) \\ \sqrt{1 - \left( \frac{n-0.5}{M-0.5} \right)^2} & (L = 2M-1) \\ I_0 \left[ \beta \sqrt{1 - \left( \frac{m-1}{M-1} \right)^2} \right] & (L = 2M) \\ \sqrt{1 - \left( \frac{n-1}{M-1} \right)^2} & (L = 2M-1) \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $1 \leq m, n \leq M$ ,  $\beta$  为控制旁瓣的参数。

式(3)中的电流是以边缘电流为基准归一化的,也就是说:  $I_{mM} = I_{Mn} = I_{MM} = 1$  相应于切比雪夫阵列的激励电流关于  $x$  轴和  $y$  轴都对称,贝塞尔阵列天线的激励也是关于直线  $y = x$  对称的,这是因为  $I_{mn} = I_{nm}$ 。于是,当  $L = 2N$  时,只需算出  $N(N+1)/2$  个激励电流;当  $L = 2N+1$  时,只需算出  $(N+1)(N+2)/2$  个激励电流。对于  $\beta = 0$  的情况,电流  $I_{mn}$  如式(3)中的定义都等于 1。所以,均匀平面阵列是贝塞尔阵列的一种特殊情况。

### 2.2 旁瓣水平的控制

当  $\theta_0 = \phi_0 = 0$  时,天线阵辐射模式中的最高旁瓣在  $\varphi = 0$  平面内,由于辐射模式的对称性,它出现在  $\phi = \pi/2, \phi = \pi, \phi = 3\pi/2$  平面上。 $\varphi = 0$  平面的阵列因数变为

$$F(\theta) = \begin{cases} 4 \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N I_{mn} & (L = 2N) \\ \cos \left[ (2m-1)\pi \frac{d_z}{\lambda} \sin \theta \right] & (L = 2N+1) \\ \sum_{m=1}^{N+1} \sum_{n=1}^{N+1} \epsilon_m \epsilon_n I_{mn} & (L = 2N+1) \\ \cos \left[ 2(m-1)\pi \frac{d_z}{\lambda} \sin \theta \right] & (L = 2N+1) \end{cases} \quad (4)$$

利用切比雪夫多项式的特点,式(4)可写为

$$F(\theta) = F(z) = \begin{cases} 4 \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N I_{mn} T_{2m-1}(z) & (L = 2N) \\ \sum_{m=1}^{N+1} \sum_{n=1}^{N+1} \epsilon_m \epsilon_n I_{mn} T_{2m-2}(z) & (L = 2N+1) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{其中: } z = \cos\left(\frac{\pi d_x}{\lambda \sin\theta}\right)$$

$T_p(\cdot)$  表示  $p$  阶切比雪夫多项式。很明显  $F(z)$  是关于  $z$  的多项式。 $F(z)$  的归一化形式为

$$F_n(z) = \frac{F(z)}{F(\theta=0)} = \frac{F(z)}{F(z=1)} \quad (6)$$

在旁瓣上,  $\phi=0$  平面上的顶点与  $\theta$  和  $z$  的值有关,  $F(z)$  中的与  $z$  有关的项消失了。既然贝塞尔阵列的最大旁瓣是紧挨着主瓣的, 那么对应最大旁瓣的  $z$  值出现在  $dF_n(z)/dz$ , 称它为

$$z_m = \max\left\{ \text{real roots}\left[ \frac{dF_n(z)}{dz} \right] \right\} \quad (7)$$

对应的  $\theta$  值为

$$\theta_m = \sin^{-1}\left[\frac{\lambda}{\pi d_x} \cos^{-1}(z_m)\right] \quad (8)$$

最大旁瓣的 dB 表示为

$$MSLL = 10 \log_{10} |F_n(z_m)| \quad (9)$$

对于每一个  $\beta$  值, 得到一组  $I_{mn}$  值, 并且对应的  $MSLL$  的值可通过式(5)、式(6)、式(7)和式(9)计算得出, 并可以将基于  $\beta$  的  $MSLL$  图形画出来。为了找到  $\beta$  的值, 需要设置一系列的最大旁瓣电平, 通过实验结果, 可发现这些值和  $d_x, d_y$  无关, 并且和  $\phi_0, \theta_0$  也无关。

为了简单, 可将  $\phi_0, \theta_0$  设为零, 此时这些值只与  $L$  有关。用凯赛窗设计 FIR 滤波器时, 只有  $\beta$  对波纹影响的经验公式。

### 2.3 半功率波束宽度

半功率波束宽度是指在  $\phi=\phi_0$  平面上, 主瓣最大值的两侧功率密度下降到一半时两个方向的夹角<sup>[3]</sup>。

对于  $\phi_0=0$  平面, 这两个方向对应下式的两个实根:

$$F_n(z) - \frac{1}{\sqrt{2}} = 0 \quad (10)$$

设  $z_{h1}$  和  $z_{h2}$  是这两个实根, 并且  $\theta_{h1}$  和  $\theta_{h2}$  是半功率的两个方向, 于是有  $\theta_{h2} > \theta_{h1}$ 。半功率宽度 (HPBW) 为

$$HPBW = \theta_{h2} - \theta_{h1} =$$

$$\sin^{-1}\left[\frac{\lambda}{\pi d_x} \cos^{-1}(z_{h2})\right] - \sin^{-1}\left[\frac{\lambda}{\pi d_x} \cos^{-1}(z_{h1})\right] \quad (11)$$

### 3 贝塞尔阵列与切比雪夫阵列比较

本文用两种方法对不同阵子数的贝塞尔阵列天线和切比雪夫阵列天线进行了仿真计算。应用矩量法结合式(3), 用 MATLAB 语言编程计算了各个阵子上的电流分布, 再利用式(4)和式(5)编程计算了贝塞尔阵列天线和切比雪夫阵列天线的方向系数。图 1 给出了该程序计算的结果。

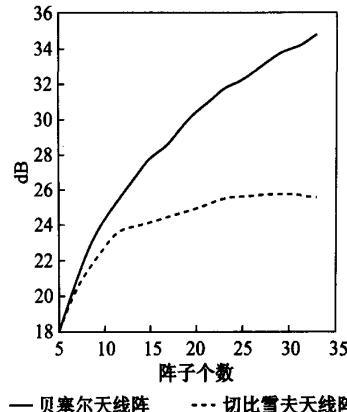


图 1 贝塞尔天线阵和切比雪夫天线阵方向系数的比较  
Fig. 1 The comparison of directivity coefficient for Bassel and Chebyshev planar array antenna

为了验证该计算结果是否精确, 本文又应用 ANSOFT 公司的 HFSS 软件进行了计算加以验证, 两种方法的计算结果非常吻合, 因此证明该程序正确。

由图 1 可见, 随着阵子数的增多, 贝塞尔天线阵的方向系数一直在增大, 但是切比雪夫天线阵的方向系数随着阵子数的增多出现了饱和现象, 这就是说: 当阵子数增多到一定程度的时候, 方向系数不再增加, 而是趋于一个常数。所以, 当需要多阵子强方向性的天线时, 应该采用贝塞尔阵列天线<sup>[4]</sup>。

若考虑  $6 \times 6$  和  $9 \times 9$  的贝塞尔阵列天线, 其阵子是沿着  $x$  轴和  $y$  轴均匀分布的, 则选择  $d_x = d_y = 0.5\lambda$ 。 $6 \times 6$  贝塞尔阵列天线每个阵子上的

激励电流的模值如表 1 所示, 二维辐射方向图如图 2 所示。9×9 贝塞尔阵列天线每个阵子上的激励电流的模值如表 2 所示, 二维辐射方向图如图 3 所示。

表 1 36 阵子贝塞尔阵列天线的电流分布模值

Tab.1 The current distribution excitation of a Bessel planar array with  $6 \times 6$  elements

$ I_{mn} $	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
$m = 1$	1.231	1.199	1.105
$m = 2$	1.199	1.168	1.078
$m = 3$	1.105	1.078	1.000

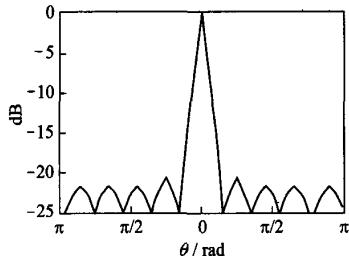


图 2  $6 \times 6$  贝塞尔阵列天线的二维辐射方向图

Fig.2 Two-dimensional radiation pattern of a Bessel planar array antenna with  $6 \times 6$  elements

表 2 81 阵子贝塞尔天线阵的电流分布模值

Tab.2 The current distribution excitation of a Bessel planar array with  $9 \times 9$  elements

$ I_{mn} $	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$	$n = 4$	$n = 5$
$m = 1$	2.131	2.075	1.913	1.661	1.345
$m = 2$	2.075	2.022	1.866	1.625	1.321
$m = 3$	1.913	1.866	1.731	2.3463	1.253
$m = 4$	1.661	1.625	2.3463	1.355	1.143
$m = 5$	1.345	1.321	1.253	1.143	1.000

由式(4)编程计算, 可得到第一类修正的零阶贝塞尔函数即  $I_0(\cdot)$  的综量, 再带入用 MATLAB 语言编写的计算第一类修正的零阶贝塞尔函数程序中, 就可以得到贝塞尔阵列天线每个阵子上的激励电流的模值。表 1 和表 2 给出的是归一化后的电流值。

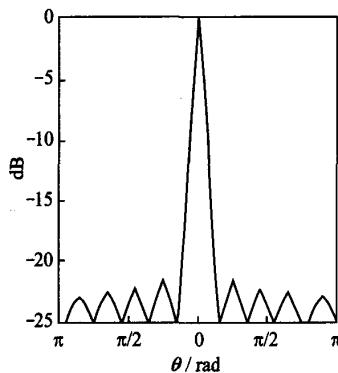


图 3  $9 \times 9$  贝塞尔阵列天线的二维辐射方向图

Fig.3 Two-dimensional radiation pattern of a bessel planar array antenna with  $9 \times 9$  elements

因为阵子上的电流分布是关于  $x$  轴和  $y$  轴对称的, 所以给出部分即可确定阵子上的电流分布。对于 36 阵子的贝塞尔阵列天线, 本文只给出了 9 个阵子的电流分布; 对于 81 阵子的贝塞尔阵列天线, 本文只给出了 25 个阵子的电流分布。

## 4 结束语

本文介绍了贝塞尔阵列天线的设计方法, 给出了阵子上辐射电流分布的表达公式, 详述了计算半功率宽度的方法和控制最大旁瓣电平的方法。贝塞尔阵列天线的性能稳定, 在多阵子的情况下比切比雪夫天线阵列的方向性系数高, 并且不会出现饱和现象。

## 参考文献

- [1] 汪茂光, 吕善伟, 刘瑞祥. 阵列天线分析与综合 [M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1989.
- [2] Kabalan, K. Y., A. El-Hajj, M. Al-Husseini. The Modified Chebyshev Planar Arrays [J]. Radio Sci., 37 (5): 1082.
- [3] A. W. Rudge. The Handbook of Antenna Design [M]. Herts : P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1982.
- [4] 陆全康, 赵蕙芬. 数学物理方法 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>